



УДК 62-83

4.2. АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

SENSIVITY ANALYSIS OF ROBUST AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

Ишматов Закир Шарифович, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: z.sh.ishmatov@urfu.ru. Тел.: (343)3754646

Волков Михаил Анатольевич, канд. техн. наук, доцент каф. «Вычислительная техника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: volkov80@mail.ru, Тел.: +79089036204

Гурентьев Евгений Александрович, канд. техн. наук, ЗАО «Автоматизированные системы и комплексы», 620137, г. Екатеринбург, а/я 343, ул. Студенческая д.1-Д. E-mail: gurentev79@mail.ru, Тел.: (343) 360-05-01

Zakir Sh. Ishmatov, Cand. Sc., Ural federal university named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: z.sh.ishmatov@urfu.ru. Ph.: (343)3754646

Michail A. Volkov, Cand. Sc., Ural federal university named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: volkov80@mail.ru, Ph.: +79089036204

Evgeny A. Gurentjev, Cand. Sc., CJSC “Automated systems and complexes”, 620137, Student street, 1-D, Ekaterinburg, Russia. E-mail: gurentev79@mail.ru, Ph.: (343) 360-05-01

Аннотация: Рассматривается один из вариантов построения робастной системы управления с использованием метода полиномиальных уравнений. Приводятся обобщенные точечные и интервальные модели объекта регулирования, вводится понятие относительной вариации объекта. Показано, что использование робастного регулятора позволяет повысить порядок астатизма системы и существенно уменьшить влияние параметрических и внешних возмущений на качество регулирования.

Abstract: The variant of for building the robust control system with using the polynomial equations method is considered. Generalized point and interval models of the controlled plant are shown. The concept of the plant relative variation is introduced. It is shown that the using of robust controller allows to improve the system astaticism order and significantly reduce the influence of parametric and external disturbances on the control quality.

Ключевые слова: интервальная модель, полиномиальный метод синтеза, робастное управление, анализ робастности.

Key words: interval model, polynomial method of synthesis, robust control, robustness analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Любая система автоматического управления функционирует в условиях изменяющихся с течением времени параметров и при наличии внешних и внутренних возмущающих воздействий. Эти факторы препятствуют качественному управлению координатами замкнутой системы. Применение метода полиномиальных уравнений для синтеза регуляторов позволяет синтезировать системы управления со слабой параметрической чувствительностью и улучшенной отработкой возмущающих воздействий [1-4].

Большинство внешних возмущений возникает случайным образом и варьируется в широких

пределах. Примерами могут служить: изменение момента нагрузки двигателя, флуктуации значения напряжения контактной сети подвижных составов (трамваи, троллейбусы), «просадки» напряжения в «слабых» сетях (например, при питании электроприводов буровых установок, карьерных экскаваторов от длинных кабельных линий) и т.д. К внутренним возмущающим воздействиям можно отнести влияние перекрестных связей, которые обусловлены составляющими в уравнениях статорных цепей (основную роль в них играет ЭДС вращения), момент упругости механической связи между двигателем и исполнительным механизмом, вязкое трение в механических передачах и т.д.

Основными источниками вариации параметров в системах асинхронного электропривода являются собственно асинхронный двигатель, включая его нелинейности, и исполнительный механизм. К таким параметрам можно отнести активные сопротивления обмоток статорных и роторных цепей, суммарные приведенные моменты инерции элементов, жестко связанных с двигателем и механизмом, приведенная эквивалентная жесткость, характеризующая безынерционную упругую связь между этими массами, эффекты, связанные с насыщением магнитной цепи и вытеснением токов, и т.д.

МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

Для анализа влияния вариации параметров на качество процессов в замкнутой системе предлагается использовать точечные и интервальные модели объектов регулирования. Первые, благодаря простой структуре, используются для синтеза САУ, вторые, учитывающие влияние вариации параметров объекта и внешних воздействий, применяются для анализа полученных систем.

В общем виде расчетная (точечная, номинальная) передаточная функция объекта представляется в виде [4-6]:

$$W_o(s) = \frac{P(s)}{s^i Q(s)}, \quad (1)$$

где коэффициенты полиномов $P(s) = \sum_{k=0}^{n_p} p_k s^k$ и

$Q(s) = \sum_{k=0}^{n_q} q_k s^k$ имеют фиксированные значения,

обычно соответствующие номинальным значениям параметров объекта. При синтезе полиномиальным методом обычно такую модель объекта делят на компенсируемую и некомпенсируемую части [4]:

$$W_o(s) = W_{ок}(s)W_{он}(s) = \frac{P_K(s)}{s^i Q_K(s)} \cdot \frac{P_H(s)}{Q_H(s)}.$$

Тогда регулятор можно представить в виде:

$$W_p(s) = \frac{M(s)P_K(s)}{s^j N(s)Q_K(s)}, \quad (2)$$

где $M(s), N(s)$ – искомые при синтезе полиномы регулятора.

Все параметры объекта меняются в некотором ограниченном диапазоне. Если известны границы вариации этих параметров, то объект регулирования можно представить в виде «интервальной» передаточной функции:

$$\tilde{W}_o(s) = \frac{\tilde{P}(s)}{s^i \tilde{Q}(s)} = W_o(s) \tilde{W}(s), \quad (3)$$

где $\tilde{P}(s) = \sum_{k=0}^{n_p} \tilde{p}_k s^k$ и $\tilde{Q}(s) = \sum_{k=0}^{n_q} \tilde{q}_k s^k$ –

интервальные полиномы, в которых коэффициенты принадлежат ограниченному интервалу $\tilde{p}_k \in [\underline{p}_k; \overline{p}_k]$ и $\tilde{q}_k \in [\underline{q}_k; \overline{q}_k]$; $\underline{p}_k, \overline{p}_k$ – нижние и верхние границы коэффициентов полинома $\tilde{P}(s)$; $\underline{q}_k, \overline{q}_k$ – нижние и верхние границы коэффициентов полинома $\tilde{Q}(s)$;

$\tilde{W}(s) = \frac{\tilde{P}(s)Q(s)}{\tilde{Q}(s)P(s)}$ – относительная вариация

передаточной функции объекта, характеризующая все отклонения параметров объекта регулирования от расчетных. Очевидно, что когда параметры объекта равны расчетным, $\tilde{W}(s) = 1$. Таким образом, интервальный объект – это множество, образованное точечными объектами, параметры которых находятся в указанных интервалах.

СТРУКТУРА РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА

На рис. 1 показаны структурные схемы традиционной и робастной САР. На рис. 1, б представлена структурная схема робастной САР, полученная с помощью общего решения полиномиального уравнения синтеза [4,5]. Из структурной схемы видно, что в состав робастного регулятора входят традиционный регулятор $W_p(s)$ и точечная модель объекта $W_o(s)$, параметры которой неизменны. Невязка $e(t) = y(t) - y_m(t)$, равная разнице выходных сигналов реального объекта и его модели, проходя через звено с передаточной функцией $W_p^{-1}(s)W_o^{-1}(s)$ преобразуется в сигнал, равный разнице ошибок замкнутых систем с реальным интервальным и эталонным точечным объектами. Далее через звено $D(s)$, которое является в общем случае фильтром, он подается на вход системы. На рис. 1, б звенья, входящие в состав робастного регулятора, объединены пунктирной рамкой.

Дробно-рациональную функцию $D(s)$ целесообразно выбрать в виде:

$$D(s) = \frac{1}{A_D(s)} = \frac{1}{(T_D s + 1)^v}, \quad (4)$$

где $A_D(s)$ – устойчивый полином; T_D – настроечный параметр робастного регулятора,

значение которого выбирается достаточно малым, с тем, чтобы можно было считать $D(s) \approx 1$; степень v полинома $A_D(s)$ выбирается из условия реализуемости звена

$$\frac{D(s)}{W_p(s)W_o(s)}.$$

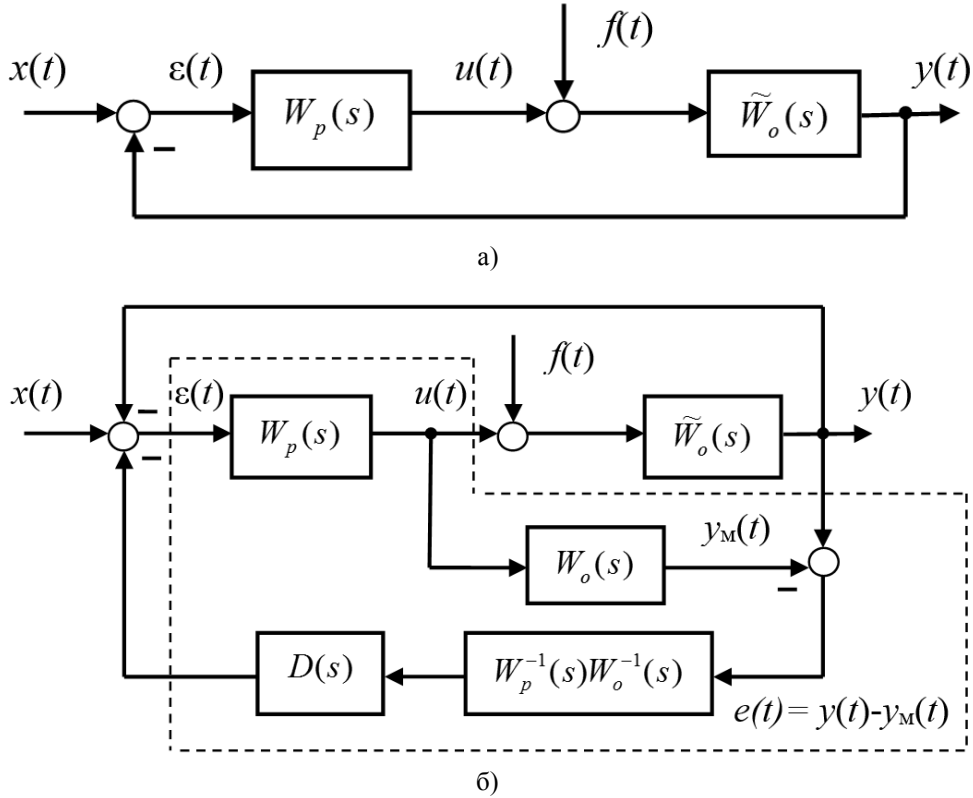


Рис. 1. Структуры типовой (а) и робастной (б) САР

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РОБАСТНОЙ САР

Найдем передаточные функции разомкнутых типовой и робастной систем:

$$\begin{aligned} G^{\text{тип}}(s) &= W_p(s)\tilde{W}_o(s) = \\ &= W_p(s)W_o(s)\tilde{W}(s) = \\ &= \frac{M(s)P_H(s)}{s^{i+j}N(s)Q_H(s)}\tilde{W}(s); \\ G^{\text{роб}}(s) &= \\ &= \frac{M(s)P_H(s) + s^{i+j}N(s)Q_H(s)D(s)}{s^{i+j}N(s)Q_H(s)[1-D(s)]}\tilde{W}(s). \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

Анализ этих соотношений показывает, что порядок астатизма по задающему воздействию типовой системы равен общему количеству интегрирующих составляющих в объекте и регуляторе $i+j$. В робастной системе, благодаря сомножителю знаменателя $[1 - D(s)]$, порядок астатизма всегда на единицу больше, то есть равен $i+j+1$. Очевидно, что порядок астатизма по

возмущающему воздействию в робастной системе будет также на единицу больше, чем в типовой. Передаточные функции от входа $x(t)$ к выходу $y(t)$ замкнутой типовой и робастной САР (см. рис. 1) примут соответственно вид:

$$\Phi^{\text{тип}}(s) = \frac{W_p(s)W_o(s)}{W_p(s)W_o(s) + 1/\tilde{W}(s)}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi^{\text{роб}}(s) &= \\ &= \frac{W_p(s)W_o(s)}{W_p(s)W_o(s) + D(s) + [1 - D(s)]/\tilde{W}(s)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Передаточные функции от возмущающего воздействия $f(t)$ к выходу $y(t)$ равны:

$$\Phi_f^{\text{тип}}(s) = \frac{W_o(s)}{W_p(s)W_o(s) + 1/\tilde{W}(s)}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Phi_f^{\text{роб}}(s) &= \\ &= \frac{[1 - D(s)]W_o(s)}{W_p(s)W_o(s) + D(s) + [1 - D(s)]/\tilde{W}(s)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Анализ этих выражений показывает, что при отсутствии параметрических возмущений (т.е. $\tilde{W}(s)=1$) в обеих системах настройки определяются регулятором и соответствуют расчетным, а выражения (7) и (8) практически совпадают. При отклонении параметров объекта от расчетных в типовой САР относительная вариация объекта $\tilde{W}(s)$ оказывает существенное влияние на характеристический полином замкнутой системы, и, как следствие, на показатели САР. В робастной системе, из-за наличия сомножителя $1-D(s) \approx 0$, влияние относительной вариации объекта $\tilde{W}(s)$ минимально и система сохраняет показатели устойчивости, качества и точности близкими к расчетным. Те же закономерности наблюдаются и в выражениях (9) и (10). Кроме того, из-за наличия сомножителя $1-D(s) \approx 0$ в числителе (10), передаточная функция по возмущению в робастной системе близка к нулю, что обеспечивает эффективную обработку возмущающих воздействий.

Заметим, что уменьшая постоянную времени T_D в выражении (4), можно теоретически свести к нулю чувствительность робастной САР к параметрическим и внешним возмущениям. То есть эта постоянная времени определяет «степень робастности» системы. Однако ее уменьшение приводит к усилению влияния помех. Поэтому выбор величины T_D должен основываться на разумном компромиссе между робастностью системы и допустимым уровнем помех.

Эффективность робастной системы подтверждена математическим моделированием и экспериментальными исследованиями частотно-регулируемого асинхронного электропривода [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная структура робастной САР, полученная из общего решения полиномиального уравнения синтеза, позволяет по сравнению с

типовой структурой увеличить порядок астатизма системы, повысить качество отработки возмущающих воздействий и снизить чувствительность системы к изменениям параметров объекта до необходимого уровня. Недостатком системы является повышенное по сравнению с типовой системой влияние помех.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Гурентьев Е.А. Робастная цифровая система управления асинхронным электроприводом. // Электротехника, 2009, №9. С. 34–41.
2. Ишматов З.Ш., Гурентьев Е.А. Синтез методом полиномиальных уравнений систем электропривода, инвариантных к параметрическим и внешним возмущениям. // Электротехника, 2007, №11. С. 30–37.
3. Ишматов З.Ш., Гурентьев Е.А. Синтез адаптивных регуляторов электропривода методом полиномиальных уравнений. // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов / Под ред. А.С. Сарварова. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – Вып.14. С. 22–32.
4. Ишматов З.Ш. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы: монография / З.Ш. Ишматов. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 278 с.
5. Гурентьев Е.А., Ишматов З.Ш. Модифицированная методика синтеза робастных регуляторов асинхронного электропривода. // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 18. – Магнитогорск: МГТУ, 2010. С. 193 – 203.
6. Ишматов З.Ш., Плотников Ю.В., Гурентьев Е.А. Робастные регуляторы тока и скорости частотно-регулируемого асинхронного электропривода. // Электротехника, 2014, №9.